カオスニューラルネットワークスの行動学的アプローチ

株式会社ニコンシステム　沢村　嗣生　KGI03615@niftyserve.or.jp

1　はじめに

連続値の内部状態を持つニューラルネットワークの拡張として、大域結合写像によるカオスニューラルネットワークモデルが研究されている。個々のニューロンをカオス振動子に見立てたモデルでは、組み合わせ最適化問題への応用や記憶パターンの埋め込みといったアプローチの研究が行われている [1, 2, 3]。そこではニューロンの発生する自発的なゆらぎにより、エネルギーの極小値である最適解や埋め込みパターンの間を遍歴する現象が見つかっている。

本研究ではニューラルネットワークの内部状態に個体の行動を対応させた。ネットワークを構成する個々のニューロンに意味付けをし、その発火の度合で行動の強さを決めることにする。これよってネットワークの内部状態の遍歴を単なるパターンの遍歴としてとらえるのではなく、ネットワーク内部のダイナミクスが時間発展にともなって自発的に行動を選択するという観点で捉えることができる。また、特定ニューロンに外部から積極的に刺激を与えることで、ネットワーク外部の環境を内部のダイナミクスに反映することを試みた。ニューラルネットワークを複数個用意し、ニューロンへの刺激を媒介にした相互作用をネットワーク間に設けることで、ネットワークスという集団の運動を考えた。

2　モデルの構築

モデルを構成する上で

- 個体内部のダイナミクスによる行動選択をもつ（内部状態の遍歴が起こる）こと。
- 外部の環境（個体間相互作用）を個体内部のダイナミクスに反映できること。

の二点が最低限必要となる。

ここではその条件を満たすモデルの一つとして、野沢のカオスニューラルネットワークモデル [2, 3] を採用した。さらにその上で

- 個々のネットワークはなるべく小数自由度にすること。
- ネットワークスという集団（すなわち全体としてのネットワーク）内で、個のネットワークという存在がはっきり区別できること。

に留意し以下のようなモデルを考えた。

2.1　個体の構成

- 1 個体の運動を 8 ニューロンから構成されるカオスニューラルネットワークにより定義する。
- ニューロンの内部保持値は 0.0 ～ 1.0 の実数値とする。
- 個々のニューロンに特定のベクトルの方向を割り当てる。
- ニューロンの発火の度合（内部保持値）がベクトルの大きさを示すものとし、8 本のベクトルの合成ベクトルで次の時間ステップの個体の座標位置を決める。

2.2 外部環境（個体間相互作用）の導入

- 個々のニューロンへの刺激（しきい値）として与える。
- 同一ニューロンへの複数の刺激は単純に加え合わせる。

2.3 モデル

2.3.1 ダイナミクス

各個体のニューラルネットワークは以下の式で定める。

$$p_i(n+1) = F_{q_i(n)}\{p_i(n)\}$$

$$q_i(n) = -\frac{1}{T_{ii}}\{\sum_{j\neq i} T_{ij}p_j(n) + \alpha + I_i(n)\}$$

$$F_q(p) = \gamma p + (1-\gamma)[1 - \frac{1}{2}\{1 + \tanh(\frac{p-q}{2\beta})\}]$$

p_i : i 番目ニューロンの内部保持値
T_{ij} : ニューロン j から i へのシナプス加重
I_i : i 番目ニューロンへの外からの刺激
n : 時間ステップ
α : オフセット値
β : 利得値
γ : 減衰値

上記のダイナミクスを全個体のニューラルネットワークについて実行し、全個体の全ニューロンが更新されるまでを 1 ステップとおいた同期更新を行う。

2.3.2 シナプス加重値の決定

各ニューロン間のシナプス結合は相互結合とし、内部保持値の示すパターンが遍歴を起こすようにシナプス加重値を選択する。今回、以下のようなシナプス加重マトリクスを用いた。

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c & d & e & d & c & b \\ b & a & b & c & d & e & d & c \\ c & b & a & b & c & d & e & d \\ d & c & b & a & b & c & d & e \\ e & d & c & b & a & b & c & d \\ d & e & d & c & b & a & b & c \\ c & d & e & d & c & b & a & b \\ b & c & d & e & d & c & b & a \end{bmatrix}$$

$$T_{ij} = \begin{cases} a & (i=j) \\ b & (|j-i| = 1 \; or \; |j-i| = 7) \\ c & (|j-i| = 2 \; or \; |j-i| = 6) \\ d & (|j-i| = 3 \; or \; |j-i| = 5) \\ e & (|j-i| = 4) \end{cases}$$

シミュレーションの結果 $a < 0, b > c > d > e$ とおいたときに望ましい遍歴が得られた。すなわち自己結合が負で、番号の近いニューロンどうしが強め合うようにシナプス加重値を与えた場合である。図 1にパラメータ値 $a = -1.0, b = 0.3, c = 0.0, d = -0.3, e = -1.0$ の場合の内部保持値の時間変化を示す。ここで縦軸はニューロン番号、横軸は時間ステップを示す。

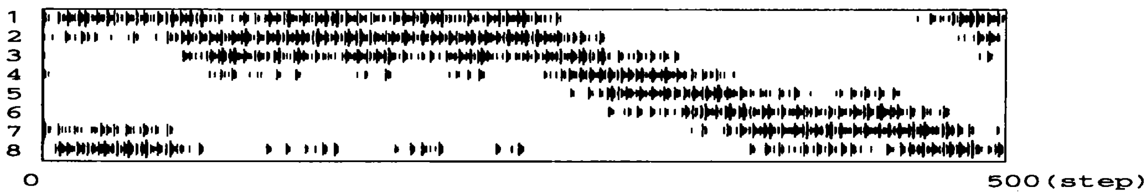

図 1: 内部保持値の時間変化

2.3.3 内部保持値の移動速度への変換

図 2に示すようにニューロンの内部保持値にベクトルを対応させ、以下の式に従って1ステップ毎の個体の速度を求める。

$$v_x(n) = \sum_{k=1}^{8} p_k(n) \cos \theta_k$$

$$v_y(n) = \sum_{k=1}^{8} p_k(n) \sin \theta_k$$

v_x, v_y : 移動速度の x, y成分
θ_k : ベクトル p_k と x 軸のなす角
n : 時刻

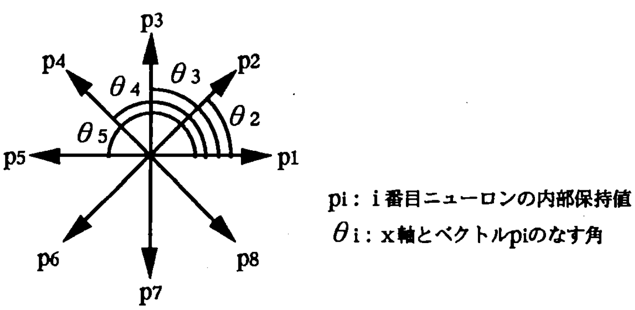

図 2: 内部保持値のベクトル化

図 3は図 1の内部保持値の時間変化を上記に従って個体の運動に変換した軌跡である。

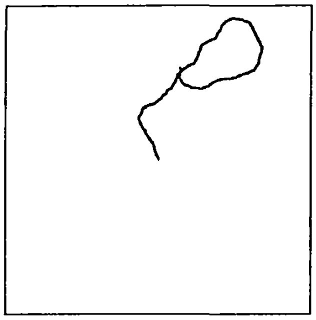

図 3: 1 個体の運動の軌跡

2.3.4 個体間相互作用及び外部環境

他個体との相互作用及び環境を特定ニューロンへの刺激（しきい値）として与える。図 4に示すように相手の方向を内部保持値のベクトル方向に離散化し、引力または斥力として与える。その際、状況に応じて以下のように値の正負を使い分ける。

- 引力
  - 積極的に与える場合：相手と同方向のニューロンに正の刺激を与える。
  - 消極的に与える場合：相手と逆方向のニューロンに負の刺激を与える。
- 斥力
  - 積極的に与える場合：相手と逆方向のニューロンに正の刺激を与える。
  - 消極的に与える場合：相手と同方向のニューロンに負の刺激を与える。

但し、ここで消極的というのは近づくのを抑える（斥力の場合)、遠ざかるのを抑える（引力の場合）という意味で用いた。また刺激の強さは制御パラメータとして与える。

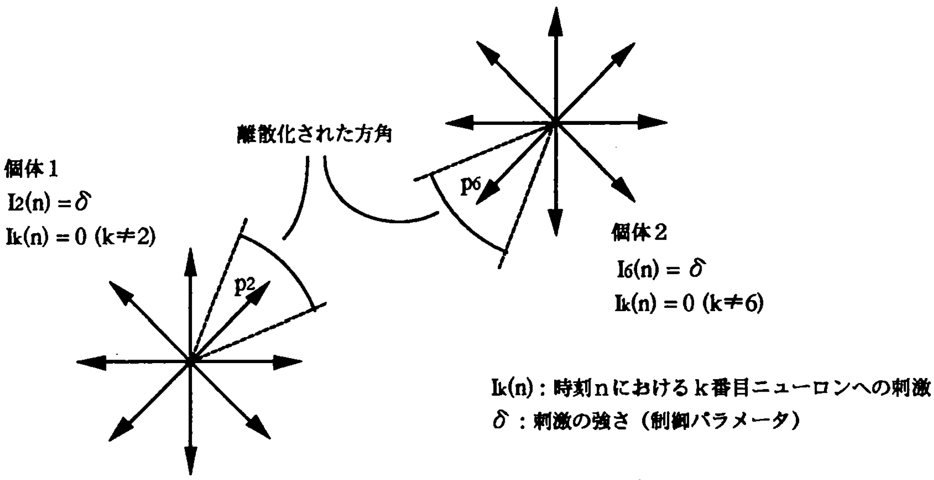

図 4: 個体間の相互作用

3　相互作用の例１

図 5の (a)、図 6、図 7は追尾相互作用（n+1 番目の個体が n 番目の個体からだけ引力を受ける）を与えた場合の様子である。ただし、先頭の個体には相互作用を与えていない。図 6の (a)～(h) はそれぞれ１番目から８番目の個体の受ける刺激の時間変化である。相互作用に距離を入れていないため、全ての時刻でいずれかのニューロンに絶えず同じ値の刺激が入っているのが見られる。先頭の個体がカオス的に運動しているため先頭に近い個体ほど刺激の変化が激しく、後方になるにつれて特定のニューロンが長時間刺激を受けているのがわかる。図 7の (a)～(h) はこの刺激に影響を受けた内部保持値の時間変化である。この相互作用の場合、個体の集団は図 5の (a) のような隊列（右下方が先頭個体）を形成する。これは各個体が刺激にしたがって運動した結果から生じる。このとき隊列の先頭個体が内部状態の遍歴によるカオス的な運動しているため、隊列が波形や輪形を描くといった様子が見られる。また各個体も内部状態の遍歴によるカオス性を有していることから隊列は常に不安定な状態になっている。

4　相互作用の例２

図 5の (b)、図 8、図 9は個体に雌雄の区別をつけ（雌雄各５個体)、異性どうしでは引力、同性どうしでは斥力が働くように相互作用を与えた場合である。個体間の相互作用の他に図 5の (b) の○印の中心から全個体に対する引力も働いている。ただし、各々の相互作用は距離に反比例するものとしてある。図 8、図 9は図 5の (b) における個体のうち点線で軌跡を示した個体の変化である。図 8では複数のニューロンが同時に刺激を受けている場面が随所に見られるが、図 9を見ると内部状態の遍歴によって、刺激の運動への影響は選択的に反映されていることがわかる。軌跡の上では、異性や固定点に誘引されながらも内部状態の遍歴によって、長時間の束縛から逃れている様子が見られる。

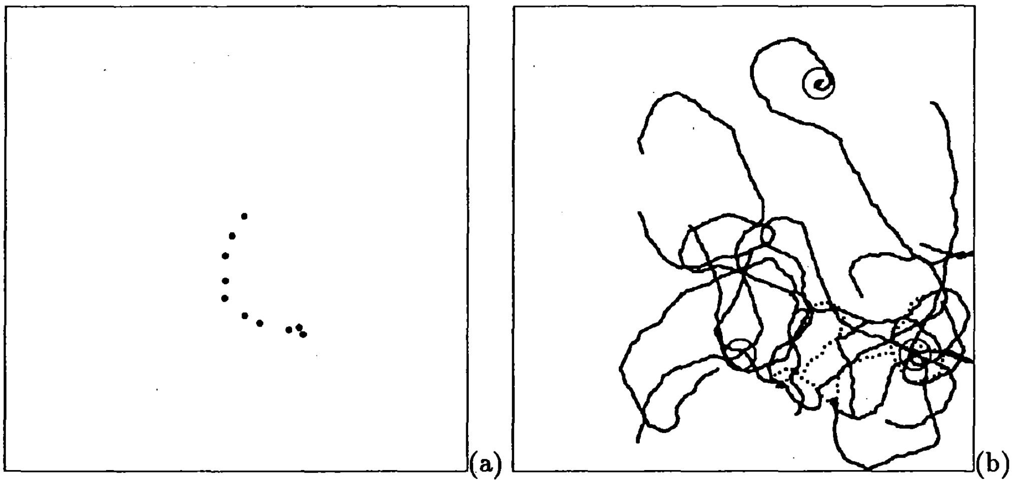

図 5: (a) 相互作用の例１における隊列、(b) 相互作用の例２における１０個体の運動の軌跡

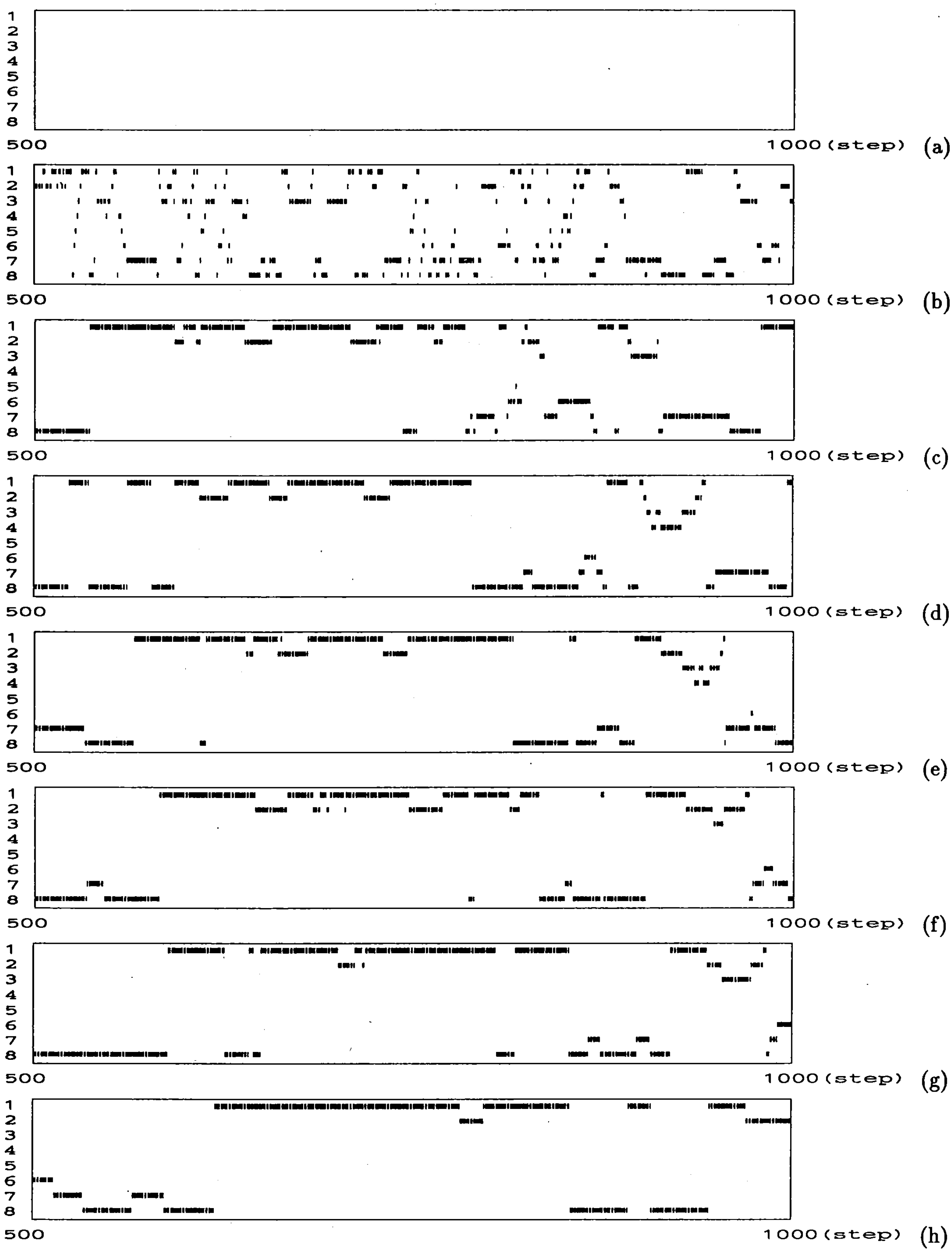

図 6: 相互作用の例 1 における 1 番目 (a)〜8 番目 (h) の個体の受ける刺激の時間変化

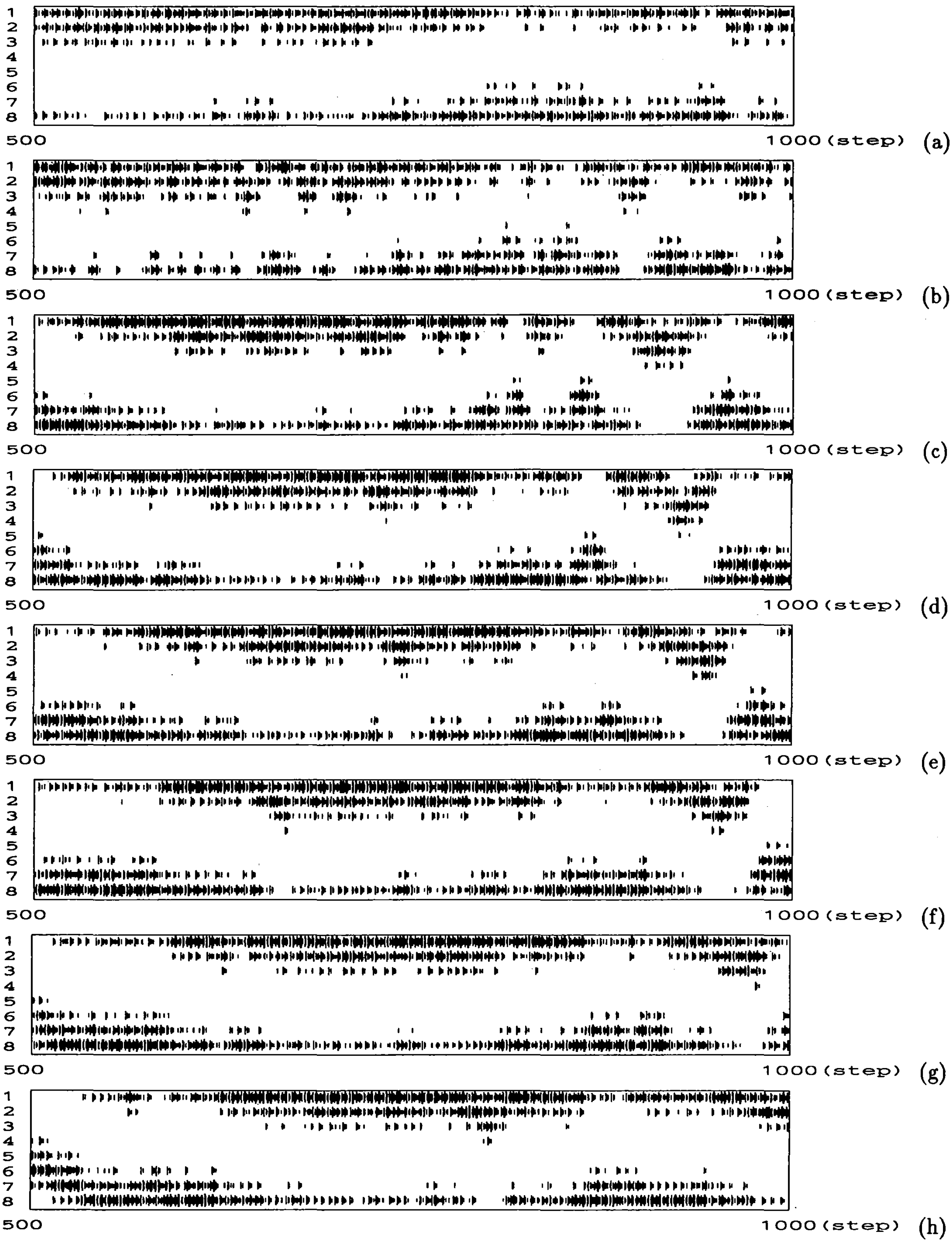

図 7: 相互作用の例 1 における 1 番目 (a)〜8 番目 (h) の個体の内部保持値の時間変化

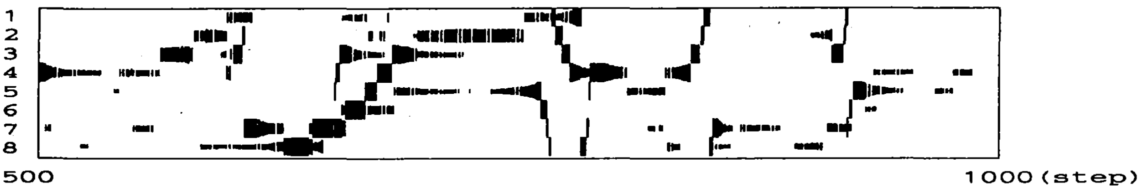

図 8: 相互作用の例２における個体の受ける刺激の時間変化

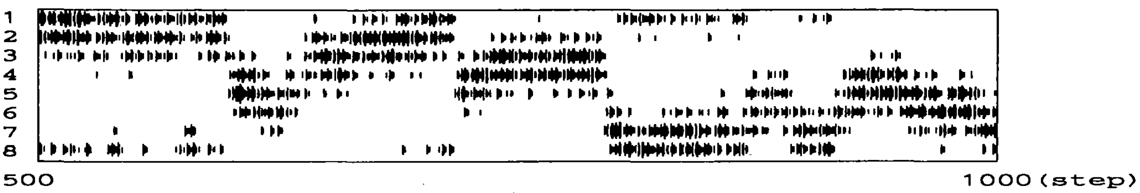

図 9: 相互作用の例２における個体の内部保持値の時間変化

5 まとめ

カオスニューラルネットワークの遍歴的性質を用いて個体の行動を決定するモデルを提案した。このモデルではネットワーク内の個々のニューロンが写像によるカオス性を有している。その結果、ネットワークの内部状態がつくるパターンにもカオス的な遍歴が生じている。この遍歴の性質を用いて生物などの行動を模倣することで、つくりこみによらない多様な運動を実現した。このモデルを用いることで、従来の相互作用のみによるモデルとは異なり、1個体しか存在しない場合でも複雑な行動を生成できる。またこのモデルで色々なパラメータを与えてシミュレーションをおこなった結果、内部状態がリミットサイクルの時は外部の影響を受けにくく、カオス的な時は外部の影響に敏感に反応する様子が見られた。特に外部からの刺激が刻々と変化する場合に顕著であった。このことからカオス性が外部環境への適応に一役かっているのではないかという印象を得た。

参考文献

[1] 合原一幸: ニューラルシステムにおけるカオス, 東京電機大学出版局 (1993).

[2] H. Nozawa: CHAOS 2, 3 (1992) 377.

[3] 野沢浩: 数理科学, No.363 サイエンス社 (1993) 24.